

# 부등건조수축으로 인한 콘크리트 구조물의 응력해석

## The Analysis of Concrete Structures due to Differential Shrinkage

오 병 환\*      최 성 철\*\*      차 수 원\*\*\*      양 인 환\*\*\*  
Oh, Byung Hwan      Choi Seong-Cheol      Cha, Soo Won      Yang In Hwan

### Abstract

Drying shrinkage means the reduction of volume of concrete because of the loss of water in concrete. This shrinkage can cause tensile stresses, crack formations at the exposure surfaces in concretes.

The purpose of this paper is to apply differential shrinkage model which uses moisture diffusion equation and to calculate more reasonable shrinkage quantity, the stresses of concretes.

The result of this paper is that the mean value of differential shrinkage is similar to the existing result but at exposures surface the shrinkage strains are more large. From this result the possibility of crack formation can take place. Thus a reasonable counterplan for tensile stresses in exposure surfaces is necessary.

### 1. 서론

콘크리트의 건조수축은 재령초기부터 구조물의 수명에 이르기까지 끊임없이 발생하며 내·외부구속에 의하여 균열을 발생시키는 원인을 제공하기도 한다. 이는 콘크리트의 건조수축으로 인한 인장응력이 인장 강도를 초과할 경우에 발생할 수 있으며 주로 대기에 노출된 표면에서 발생한다. 콘크리트의 내구성이 강조되고 있는 최근의 추세에서 건조수축으로 인한 균열은 내구성에 중대한 영향을 미칠 수 있으므로 건조수축으로 인한 응력해석이 필요하게 된다.

건조수축으로 인한 응력의 해석은 기존의 경우 ACI 209, CEB-FIP, BP 모델들을 사용하여 응력을 해석하고 있다. 이러한 모델들은 건조수축량을 계산함에 있어 단면내의 건조수축량을 평균적인 값으로 계산함으로써 외부구속에 의한 응력의 해석만을 수행한다. 따라서 노출표면부의 내부구속에 의한 인장응력의 생성을 무시하게 된다. 그러나 실제 건조수축 현상을 살펴보면 대기에 접한 콘크리트의 표면에서의 건조수축량은 구조물 내부의 그 양보다 크게 되므로 노출표면에서 내부구속에 의해 인장응력이 생성될 수도 있다. 따라서 단면의 내·외부에 따라 건조수축량이 다르게 나타나는 부등건조수축을 고려한 응력해석의 필요성을 느끼게 된다.

\* 정희원 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 서울대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

\*\* 서울대학교 공과대학 토목공학과 박사수료

## 2. 연구의 이론적 배경

### 2.1 수분분포방정식

콘크리트 내부의 물은 공극에 존재하며 확산에 의하여 주로 이동한다. 이러한 확산은 콘크리트 미소 요소내에서는 요소의 위치에 따른 습도차에 의하여 수분이 이동함으로써 일어나며 대기에 노출된 콘크리트 표면에서는 대기와의 습도차에 의해 수분이 빠져나감으로써 건조가 일어난다.

$$\begin{aligned} Q &= -D_w \text{grad}W \\ &= -D_w \frac{\partial W}{\partial H} \text{grad}H \end{aligned} \quad (1)$$

콘크리트내의 수분이동은 연속방정식을 만족시켜야 하므로

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\text{div} Q \quad (2)$$

따라서 식(1)과(2)를 조합하게 되면

$$\frac{\partial W}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}(D_w \frac{\partial W}{\partial H} \text{grad}H) \quad (3)$$

습도용량은 상수의 값으로 가정하여 습도용량을 소거하게 되면

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}(D_w \text{grad}H) \quad (4)$$

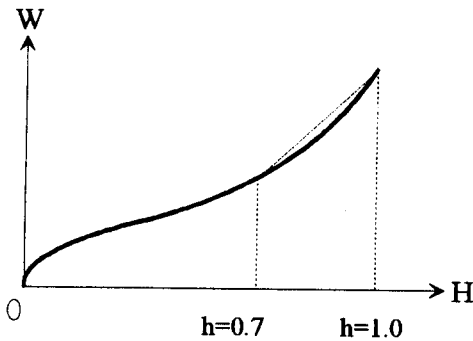


그림 1 습도용량의 상수가정

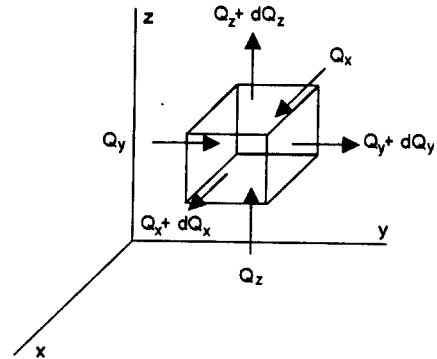


그림 2 콘크리트 미소요소내의 연속조건

### 2.2 확산계수

콘크리트내의 물의 이동은 확산에 주로 지배된다. 이러한 확산의 정도를 나타내는 확산계수는 콘크리트내부의 습도와 강도의 함수로서 콘크리트의 강도가 증가할수록, 콘크리트내의 습도가 감소할수록 확산은 느리게 일어난다. 본 논문에서는 CEB-FIP<sup>1</sup>에서 제안한 확산계수를 사용하였으며 그 식은 아래와 같다.

$$D_w(H) = D_1 \left\{ \alpha + \frac{1-\alpha}{[1 + (1-H)/(1-H_c)]^n} \right\} \quad (5)$$

이러한 확산계수가 습도에 대한 비선형함수이므로 수분분포방정식은 비선형성을 띠게 되며 실제로 확산은 콘크리트 내부습도에 매우 의존하는 성질을 갖고 있다.

### 2.3 수화반응에 의한 수분의 손실

수분분포방정식을 적용함에 있어 시간에 따른 콘크리트내의 수분의 감소는 확산을 통한 노출표면에서의 건조에 의한 수분의 감소와 수화반응에 의한 수분의 감소로 나누어 생각할 수 있다. 따라서 수화반응을 고려한 수분분포방정식을 적용해야 하며 그 식은 아래와 같다.

$$dH = \frac{\partial H}{\partial W} dW + dH_s \quad (6)$$

시간에 따른 수화반응으로 인한 수분의 감소를 살펴보면

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_s}{\partial t} &= -k_1 \frac{(H_s - H_{\infty})^m}{(1 - H_{\infty})^{m-1}} \\ &= -k_1 k_2 [1 - k_1(1 - m)t]^{m/(1-m)} \end{aligned} \quad (7)$$

그러므로 수화반응을 고려한 수분분포방정식을 적용하면

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}(D_w \text{grad}H) + \frac{\partial H_s}{\partial t} \quad (8)$$

여기서 식 (7)은 시간에 따른 수화반응에 의한 수분의 감소를 나타내는 식으로 실제의 수화반응은 단면의 위치에 따라 다르게 나타나나 식(7)에서는 단면의 위치에 관계없이 수화반응을 일정한 것으로 가정하였다. 이러한 가정은 단면의 두께가 두꺼운 경우의 예는 성립하는 것으로 알려져 있다.<sup>2)</sup> 이러한 수화반응이 수분분포에 영향을 크게 미치는 경우는 주로 고성능콘크리트에서 일어난다.

### 2.4 수분확산모델의 유한요소 정식화

수분확산모델의 유한요소정식화에서는 초기의 콘크리트내부의 습도는 포화되었다고 가정한다.<sup>6)</sup> 또한 경계조건은 대기와 접한 콘크리트의 노출표면에서 확산에 의한 수분의 손실이 일어난다고 생각한다.<sup>6)</sup> 즉

$$n \cdot Q = B_w (H - H_{em}) \quad (9)$$

앞에서 언급한 수분분포방정식의 유한요소정식화에서는 Galerkin 방법'을 사용하였으며 수화반응에 의한 수분의 손실항은 sink항으로 처리하였다. 요소는 8개의 node를 갖는 3차원 고체요소를 사용하였으며 식(8)를 Galerkin 방법을 적용하면

$$H(x, y, z, t) = [N(x, y, z)]\{h(t)\} \quad (10)$$

### 2.5 시간영역에서의 유한차분화

콘크리트내부의 수분은 초기에는 포화되었다고 가정하나 시간이 지남에 따라 감소하게 된다. 이러한 시간에 따른 수분의 감소를 표현하기 위해서는 시간영역에서의 유한차분화가 필요하게 된다. 시간영역에서의 유한차분화 방법에는 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 시간간격의 크기에 관계없이 안정적인 해를 갖는 Crank-Nicolson 방법을 사용하였다. 또한 비선형 수분분포방정식을 풀기 위해서 Secant

방법을 사용하였다. 즉

$$[C]\left\{\frac{\partial h(t)}{\partial t}\right\} + [K]\{h(t)\} = \{R\} \quad (11)$$

## 2.6 습도변형계수

습도변형계수란 콘크리트내의 단위습도가 변함에 따라 변형이 일어나는 정도를 나타내는 계수로서 주로 밀폐된 항온항습실에서 주위의 습도를 일정하게 유지시키는 가운데 시편내부의 습도가 주위의 습도와 완전히 일치되는 경우에 변형을 측정하여 습도변형계수를 측정한다. 습도변형계수는 중심부에서 값이 크며 표면부로 갈수록 그 값이 줄어드는 경향을 보인다.

$$\alpha_h = \frac{\epsilon_{sh_{\infty}}}{\Delta H} \quad (12)$$

$$\epsilon_{sh} = \alpha_H \Delta H \quad (13)$$

이러한 습도변형계수  $\alpha_h$  가 결정되면 단위습도가 변화에 따른 변형도를 결정하게 되며 이 결과로부터 응력해석을 수행하였다.

## 3. 해석예제

### 3.1 공시체의 수분분포 및 변형도의 해석

공시체의 수분분포해석에서는 직육면체의 공시체를 가지고 수분분포를 해석하였다. 공시체의 크기는 그림 3과 같으며 공시체의 윗면만을 노출표면으로하여 해석을 수행하였다. 또한 해석에 필요한 변수들은 표 1와 같다.

수분분포해석결과를 살펴보면 노출초기에는 건조가 많이 일어나므로 단위시간동안 수분의 감소는 크게 나타나나 시간이 경과할수록 수분의 감소는 줄어드는 경향을 보이며 노출표면으로부터의 거리가 가까울수록 수분의 감소는 크게 일어나고 있다. 수분변화에 따른 변형도의 양은 초기에는 크게 나타나고 있으나 시간의 지남에 따라 그 양은 줄어들고 있으며 노출표면으로부터의 거리가 가까울수록 크게 나타나고 있다. 변형도의 평균값은 CEB-FIP의 계산결과와 비교해본 결과 큰 차이가 없다.

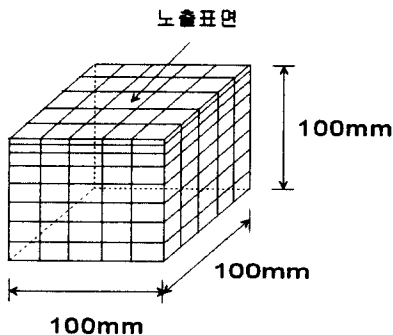


그림 3 해석 공시체의 단면

표 1 공시체의 해석변수

콘크리트 압축강도	300 kg/cm <sup>2</sup>
D <sub>i</sub>	32.23 mm <sup>2</sup> /day
B <sub>w</sub>	5 mm/day
H <sub>en</sub>	0.7
$\alpha_H$	1.9 × 10 <sup>-4</sup>

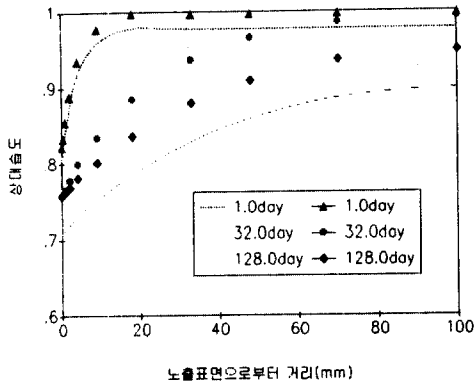


그림 4 공시체의 수분분포의 변화

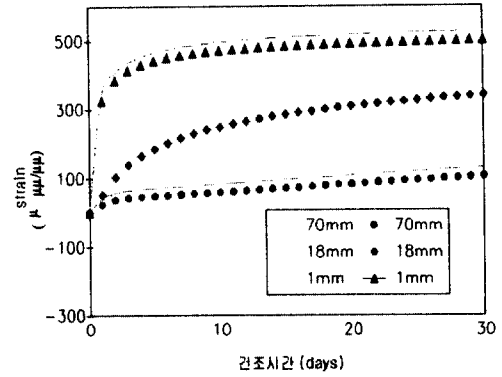


그림 5 공시체의 변형도의 변화

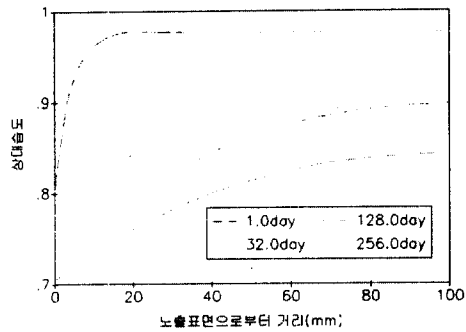


그림 6 공시체의 거리에 따른 습도분포

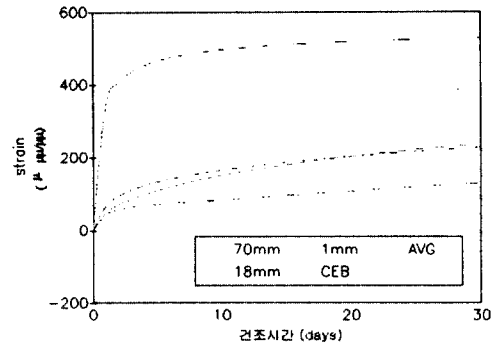


그림 7 공시체의 시간에 따른 변형도

### 3.2 내부구속을 받는 콘크리트 포장체

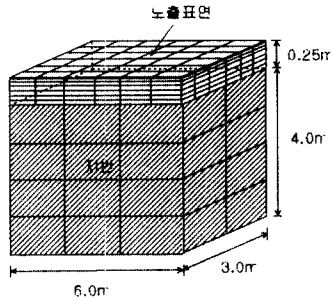


그림 8 해석 포장체 단면

응력해석은 초기에는 노출표면부에서 거리가 가까울수록 인장응력이 크게 나타나고 있으며 거리가 멀어질수록 인장응력이 감소하다가 압축응력으로 바뀌는 경향을 보이고 있다. 해석초기에는 최대인장응력이 노출표면부의 가까운 곳에서 나타나나 시간이 지남에 따라 표면부로부터 내부로 이동하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향을 보이는 원인은 건조초기에는 노출표면부의 가까운 곳에서 건조가 많이 일어나면서 변형도도 크게 나타나고 있으나 시간이 지남에 따라 건조현상이 많이 일어나는 곳이 내부로 이동하면서 이러한 현상을 보이는 것으로 사료된다.

포장체의 단면은 그림 8과 같고 해석에 필요한 변수는 공시체와 같다.

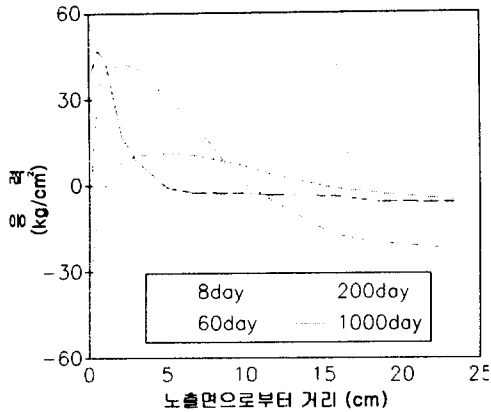


그림 9 포장체의 거리에 따른 응력분포

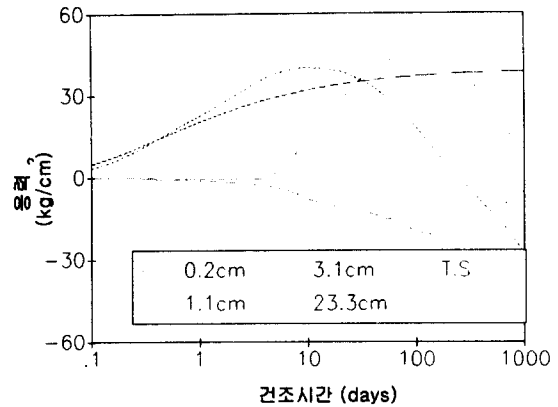


그림 10 포장체의 시간에 따른 응력

#### 4. 결론

- (1) 수화반응을 고려하여 수분분포를 해석하는 경우 수화반응의 영향을 고려않은 경우에 비해 수분감소가 더 일어난다.
- (2) 수분분포방정식을 이용하여 건조수축 해석결과 건조수축량 평균값은 기존의 해석모델에서 제안한 계산값과 큰 차이가 없으나 대기에 노출된 면에 가까운 곳에서는 건조수축량이 크게 나타나고 있으며 노출단면으로부터 거리가 멀어질수록 그 건조수축량이 작게 나타나는 것으로 보인다.
- (4) 부등건조수축은 단면에 외부구속이 없더라도 응력을 유발시킬수 있으므로 이를 해석에 고려 해주어야 한다.
- (5) 내부구속을 받는 콘크리트포장의 경우 대기에 접한 단면에서 부등건조수축으로 인한 인장응력이 생성될 수 있으며 이러한 인장응력이 인장강도를 초과하여 균열이 발생할 수 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다고 사료된다.

#### 참고문헌

1. L.J. Parrott, "Moisture conditioning and transport properties of concrete specimens," *Materials and Structures*, 1994,27,p.460~468
2. Yunping Xi, Zdenek P. Bazant, and Hamlin M. Jennings, "Moisture Diffusion in Cementitious Materials(Moisture Capacity and Diffusivity)," *Advanced Cement Based Materials*, 1994,p.1248~1257
3. Zdenek P. Bazant, Joong-Koo Kim, "Consequences of diffusion theory for shrinkage of concrete," *Materials and Structures*, 1991,24,p.323~345
4. Zdenek P. Bazant, M.ASCE and Werapol Thonguthai, "Pore pressure and drying of concrete at high temperature," *Journal of Engineering Mechanics*, Oct.1978,p.1060~1079
5. Kenji Sakata, "A study on Moisture Diffusion in Drying and Drying Shrinkage of Concrete," *Cement and Concrete Research*, 1983,13,p.216~224
6. A.M.Alvaredo and F.H.Wittmann, "Shrinkage as influenced by strain softening and crack formation," *RILEM*, 1993, Sep6~9, p.103~113
7. P.Kumar.Mehta, "Concrete," Prentice-Hall, 2nd Edition 1993